



УДК 62.111.2

## РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ОБМОТОК СТАТОРА В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ОБМОТКАМИ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТОВ «ANSYS» И «ANSYS MAXWELL»

### CALCULATION OF INDUCTANCES OF STATOR'S WINDINGS IN INDUCTION MOTOR WITH RING WINDINGS BY «ANSYS» and «ANSYS MAXWELL»

**Тихонова Ольга Валерьевна**, аспирант каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: olga\_tihonova\_91@mail.ru. Тел.: +7(904)987-89-25

**Малыгин Игорь Вячеславович**, аспирант каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: mitrael\_1@mail.ru. Тел.: +7(953)601-32-56

**Пластун Анатолий Трофимович**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.t.plastun@urfu.ru. Тел.: +7(952)725-35-59

**Olga V. Tikhonova**, Post-graduate student, Department «Electrical machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: olga\_tihonova\_91@mail.ru. Ph.: +7(904)987-89-25

**Igor V. Malygin**, Post-graduate student, Department «Electrical machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: olga\_tihonova\_91@mail.ru. Ph.: +7(953)601-32-56

**Anatoliy T. Plastun**, Doctor Sc., Prof., Department «Electrical machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.t.plastun@urfu.ru. Ph.: +7(952)725-35-59

**Аннотация:** В статье рассматривается алгоритм расчета индуктивностей обмоток статора в асинхронном двигателе с кольцевыми обмотками с помощью прикладных программных пакетов «ANSYS» и «ANSYS Maxwell». В работе указывается порядок задания параметров в модели, необходимых для расчета. В ходе работы определяются основные выражения, используемые программами для вывода матриц индуктивностей, анализируются полученные результаты.

**Abstract:** In the paper algorithm for inductances calculation of stator windings in an induction motor with ring windings by «ANSYS» and «ANSYS Maxwell» is considered. The work presents the order of setting of the parameters required for the calculation in the model. In the course of the work, the basic expressions used by the programs for deriving matrices of inductances are determined, the results are analyzed, and recommendations are given to the user for carrying out such calculations.

**Ключевые слова:** индуктивность; моделирование; асинхронный двигатель; кольцевые обмотки.

**Key words:** inductance; simulation; induction motor; ring windings.

#### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что индуктивное сопротивление является одним из важных параметров, необходимых для определения различных характеристик машины, а также ее поведения в переходных режимах. Однако зачастую расчет численного значения индуктивности вызывает ряд сложностей, так как индуктивность, как известно, существенно зависит от конфигурации магнитной системы электрической машины. В методиках расчета электрических машин классической конструкции используется так

называемый «метод коэффициентов», при котором определяются значения пазовой, лобовой и дифференциальной проводимостей, зависящих, главным образом, от формы паза, длины вылета лобовой части и величины воздушного зазора. Магнитная система якоря асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками (АДКО) [1] существенно отличается от конструкции магнитной системы и способа размещения якорной обмотки электрических машин классического исполнения. В связи с этим возникает необходимость в поиске альтернативных методов решения задачи по

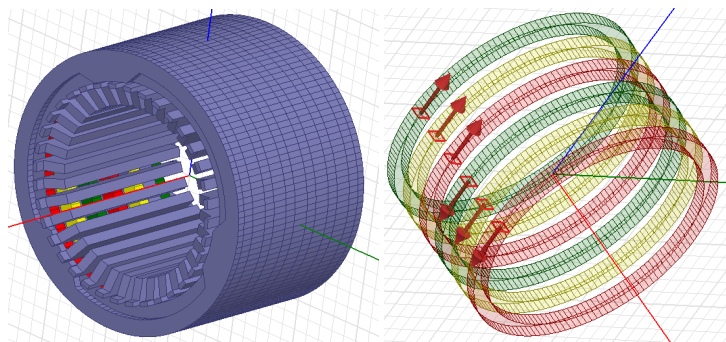


Рис. 1. а) Модель АДКО без ротора; б) Направление токов в катушках статора АДКО.

определению индуктивных сопротивлений фаз АДКО. В качестве дополнения к классическим методикам определения искомых параметров рассмотрим возможность использования специализированных программных пакетов, например, «ANSYS» и «ANSYS Maxwell».

Целью данной работы являлось ознакомление с алгоритмом расчета индуктивностей с помощью пакетов «ANSYS» и «ANSYS Maxwell», а также определение последовательности действий, необходимых пользователю для произведения расчетов.

#### ХОД РАБОТЫ

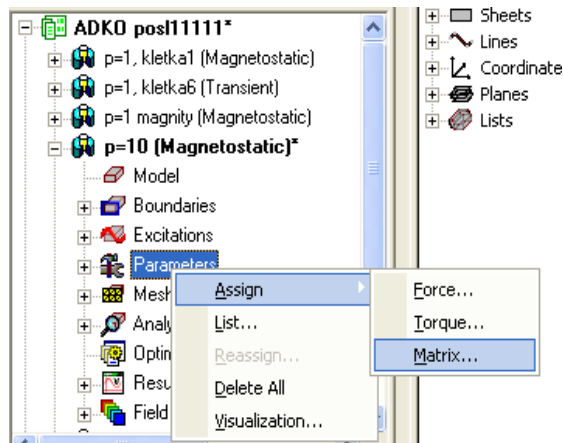


Рис. 2. Задание матрицы индуктивности

Для расчета использовалась модель АДКО с числом пар полюсов  $p=3$ . На первом этапе расчет индуктивностей фаз проводим с вынутым ротором, как показано на рис. 1, а.

Чтобы рассчитать индуктивность в вышеуказанных программных пакетах, в модели необходимо задать направление тока в катушках, мгновенное значение тока и число витков в них, а затем создать матрицу индуктивности в разделе «Параметры» (рис. 2).

На первом этапе определялась индуктивность одной катушки. Задаем направление токов в

катушках так, как показано на рис. 1, б. Каждая катушка состоит, например, из 40 последовательно соединенных витков. Для определения индуктивности катушки необходимо рассчитать индуктивность одного витка. Для этого в катушке фазы А задается ток  $I = 1$  А/виток, число витков  $W=1$ . Остальным пяти катушкам присваивается ток, равный нулю ( $I=0$ ). В этом случае рассчитывается индуктивность одного эквивалентного витка с током. Получим значение, равное:

$$L_{\text{вит}} = 5.2152 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Если катушка состоит из  $W$  последовательно соединенных витков, то ее индуктивность, как известно, прямо пропорциональна квадрату их числа, тогда:

$$L = L_{\text{вит}} \cdot W^2 \quad (1)$$

Таким образом, согласно (1):

$$L = 5.2152 \cdot 10^{-6} \cdot 40^2 = 0.0083443 \text{ Гн} \quad (2)$$

Если ток  $I=1$  А, то потокосцепление должно быть равно индуктивности:

$$\Psi = L \cdot I \quad (3)$$

$$\Psi = L = 0.0083443 \text{ Вб.}$$

Выполним аналогичный расчет в «ANSYS Maxwell».

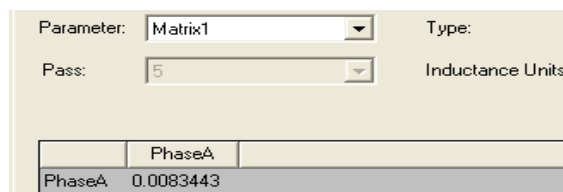


Рис. 3. Значение индуктивности катушки статора при  $W=40$ , полученное в «ANSYS Maxwell»

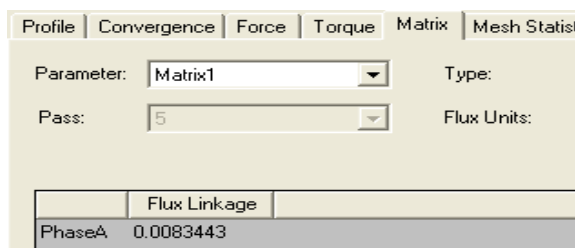


Рис. 4. Значение потокосцепления в катушке, полученное в «ANSYS Maxwell»

На рис. 3-4 видно, что значения индуктивности и потокосцепления совпадают, что является справедливым для значения тока  $I=1$  А, как было указано выше. Кроме того, значение индуктивности, указанное на рис. 3, совпадает с рассчитанным в (2).

Следующий расчет сделаем для отдельной фазы, состоящей из двух катушек, соединенных последовательно встречно. Две катушки объединяются в фазу С, каждая катушка состоит из 40 витков, результаты представлены на рис. 4-5, где

– индуктивность фазы С при отсутствии ротора:  
 $L = 0.012$  Гн ;

– потокосцепление фазы С при отсутствии ротора:  
 $\Psi = 0.0124$  Вб .

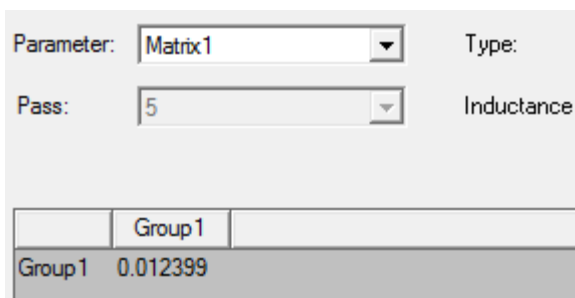


Рис. 5. Индуктивность фазы С, полученная в «ANSYS Maxwell»

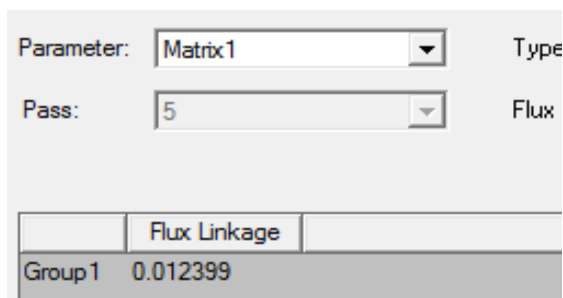


Рис. 6. Потокосцепление фазы С, полученное в «ANSYS Maxwell»

При объединении катушек в группу, согласно данным справки пакета «ANSYS Maxwell», индуктивность рассчитывается следующим образом:

$$L_{\text{гр}} = \Sigma L_i + \Sigma L_{ij} + \Sigma L_{ji} , \quad (4)$$

где  $\Sigma L_i$  – суммарная самоиндуктивность катушек, входящих в группу;  $\Sigma L_{ij}$  и  $\Sigma L_{ji}$  – взаимная индуктивность катушек, входящих в группу.

Расчет для фазы С повторяем с помощью пакета «ANSYS», получаем:

– индуктивность фазы С при вынутом роторе:  
 $L = 0.013$  Гн ;

– потокосцепление фазы С при вынутом роторе:  
 $\Psi = 0.0125$  Вб .

Расчеты, проведенные с помощью пакета «ANSYS», дали результаты, близкие к данным «ANSYS Maxwell».

На следующем этапе работы определялась индуктивность всех фаз. Для этого попарно объединены в фазы все катушки: А и Х – фаза А, В и У – фаза В, С и Z – фаза С (рис. 7), токи в фазах задаются согласно случаю, когда ток фазы С максимален и равен  $I=1$  А/виток, в фазах А и В –  $I=0.5$  А/виток. Катушки содержат по 40 витков, как и в предыдущих случаях. Результаты расчета представлены на рис. 8-9.

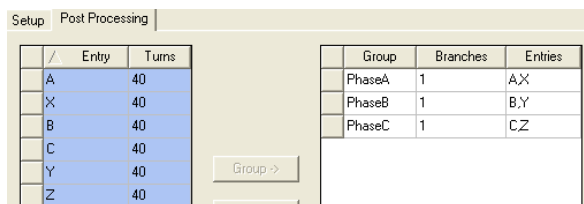


Рис. 7. Распределение катушек по фазам

Parameter:  Type:

Pass:  Inductance

	Group1	Group2	Group3	
Group1	0.012879	-0.0017442	0.0029832	
Group2	-0.0017442	0.012801	0.0029146	
Group3	0.0029832	0.0029146	0.012986	

Рис. 8. Индуктивности фаз обмотки статора, при питании всех фаз, полученные в «ANSYS Maxwell»,

Parameter:  Type:

Pass:  Flux Units:

	Flux Linkage
Group1	0.0085507
Group2	0.008443
Group3	0.015934

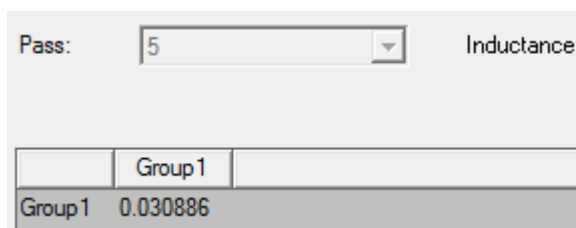
Рис. 9. Потокосцепления фаз обмотки статора при питании всех фаз, полученные в «ANSYS Maxwell»

Анализируя результаты на рис. 8-9, получим, что индуктивность фазы С, отраженная на главной диагонали,  $L=13$  мГн (рис. 8), полное потокосцепление равно:  $\Psi=16$  мВб (рис. 9). Выполним расчеты  $L$  и  $\Psi$  при одновременном питании трех фаз, используя пакет «ANSYS». При этом:

- индуктивности фаз А, В и С при вынутом роторе:  $L_A = L_B = L_C = 0.013$  Гн;
- потокосцепления фаз А и В при вынутом роторе:  $\Psi_A = \Psi_B = 0.0085$  Вб;
- потокосцепление фазы С при вынутом роторе  $\Psi_C = 0.015773$  Вб.

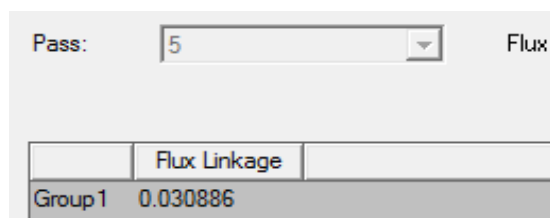
Результаты, полученные для случая одновременного питания 3 фаз с помощью «ANSYS», совпадают с данными, полученными при помощи «ANSYS Maxwell».

Выполним расчеты с учетом ротора АДКО. Сначала задаем ток  $I=1$  А/виток только на фазу С.



Group1	Inductance
Group1	0.030886

Рис. 10. Индуктивность фазы С, полученная в «ANSYS Maxwell» при наличии ротора



Group1	Flux Linkage
Group1	0.030886

Рис. 11. Потокосцепление фазы С, полученное в «ANSYS Maxwell» при наличии ротора

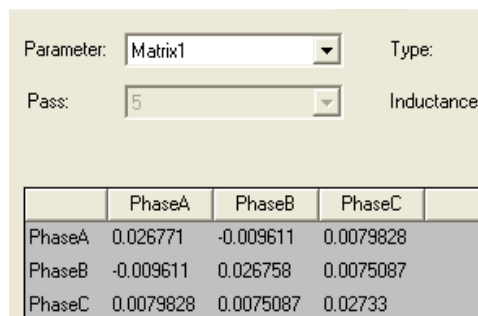
Полная индуктивность фазы С  $L=30.9$  мГн (рис. 12), потокосцепление фазы С  $\Psi=30,9$  мВб.

При определении тех же параметров с использованием пакета «ANSYS» при наличии ротора и питании только фазы С:

- индуктивность фазы С при наличии ротора:  $L = 0.065$  Гн;
- потокосцепление фазы С при наличии ротора:  $\Psi = 0.053$  Вб.

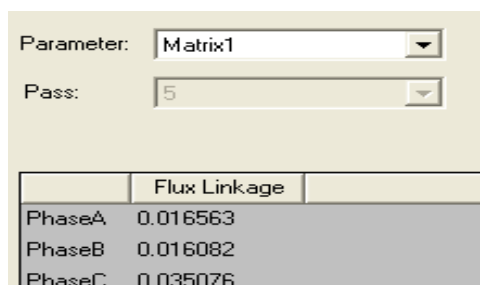
Из полученных результатов видно, что значения, которые выдает пакет «ANSYS», отличаются от значений, полученных с помощью «ANSYS Maxwell», примерно в два раза.

Выполним расчет трехфазного режима работы. Зададим в фазах А и В ток  $I=0.5$  А/виток, в фазе С –  $I=1$  А/виток.



	PhaseA	PhaseB	PhaseC
PhaseA	0.026771	-0.009611	0.0079828
PhaseB	-0.009611	0.026758	0.0075087
PhaseC	0.0079828	0.0075087	0.02733

Рис. 12. Индуктивности фаз обмотки статора, полученные в «ANSYS Maxwell», при питании 3 фаз и наличии ротора

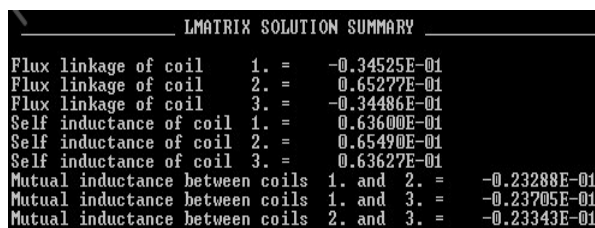


	Flux Linkage
PhaseA	0.016563
PhaseB	0.016082
PhaseC	0.035076

Рис. 13. Потокосцепления фаз обмотки статора, полученные в «ANSYS Maxwell», при питании 3 фаз и наличии ротора

Согласно рис. 12 индуктивность фазы С  $L=27.33$  мГн, а потокосцепление  $\Psi=35.1$  мВб. Повторив данный расчет в «ANSYS», получаем следующие результаты (рис. 14):

- $L_A = 0.0636$  Гн – самоиндуктивность фазы А при наличии ротора;
- $L_B = 0.0655$  Гн – самоиндуктивность фазы В при наличии ротора;
- $L_C = 0.0636$  Гн – самоиндуктивность фазы С при наличии ротора;
- $\Psi_A = \Psi_C = 0.0345$  Вб – потокосцепления фаз А, и С при наличии ротора;
- $\Psi_B = 0.0653$  Вб – потокосцепление фазы В при наличии ротора.



LMATRIX SOLUTION SUMMARY		
Flux linkage of coil 1.	=	-0.34525E-01
Flux linkage of coil 2.	=	0.65277E-01
Flux linkage of coil 3.	=	-0.34486E-01
Self inductance of coil 1.	=	0.63600E-01
Self inductance of coil 2.	=	0.65490E-01
Self inductance of coil 3.	=	0.63627E-01
Mutual inductance between coils 1. and 2.	=	-0.23288E-01
Mutual inductance between coils 1. and 3.	=	-0.23705E-01
Mutual inductance between coils 2. and 3.	=	-0.23343E-01

Рис. 14. Индуктивности и потокосцепления фаз обмотки статора, полученные в «ANSYS», при питании 3 фаз и наличии ротора

Таким образом, расчеты индуктивностей и потокосцеплений фаз асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками, выполненные с помощью программных пакетов «ANSYS Maxwell» и «ANSYS», показали, что в случае, если расчеты индуктивностей и потокосцеплений фаз проводятся для вынуженного ротора, то расчеты индуктивностей и потокосцеплений фаз совпадают. Для случая, когда магнитная система рассматривается вместе с ротором, то расчеты индуктивностей и потокосцеплений фаз существенно отличаются. Возможно, расхождение связано с тем, что при расчете в «ANSYS Maxwell» использовалась модель шихтованного ротора с пазами, тогда как в «ANSYS» – с гладким ротором.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пластун А.Т. Патент 2121207 (1996) Российская Федерация.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Ленинград: Энергия, 1978. – 600 с.
3. Рихтер Р. Электрические машины. Том 2. – Ленинград-Москва: Энергия, 1936. – 689 с.
4. Сергеев П.С. Проектирование электрических машин. – Москва-Ленинград: ГЭИ, 1950. – 591 с.
5. Данилевич Я.Б. Параметры электрических машин переменного тока./ Я.Б.Данилевич, В.В. Домбровский. – Москва-Ленинград: Наука, 1965. – 340 с.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – Москва: Энергия, 1980. – 928 с.
7. Тихонова О.В., Пластун А.Т., Малыгин И.В. О целесообразности введения прикладного пакета "Ansys Maxwell" в учебную программу для бакалавров // Сб. трудов V международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи-2014», Томск: Томский политехнический институт, 2014, том 2, с.599-603.
8. Малыгин И.В., Тихонова О.В., Пластун А.Т. Некоторые особенности применения пакета "Ansys Maxwell" для расчета электрических машин при выполнении курсового и дипломного проектирования// Сб. трудов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых Екатеринбург: УрФУ, 2014.
9. Ansoft Corporation. Maxwell 2D./ Ansoft Corporation. – Pittsburgh, USA, 2009. – 334 с.
10. Нейман З.Б., Пекне В.З., Моз Л.С. Крупные вертикальные электродвигатели переменного тока. – Москва: Энергия, 1974. – 375 с.
11. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. – М.,Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 426с.